

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Studie povlaků PVD a CVD a jejich aplikace v praxi
Study of the Coatings PVD a CVD and their Application
in Practise

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Radek Přikryl
doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Přikryl**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Studie povlaků PVD a CVD a jejich aplikace v praxi**
Study of the Coatings PVD and CVD and their Application in Practice

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte vlastnosti a výrobu povlaků PVD a CVD.
2. Prostudujte aplikace použití těchto povlaků v praxi.
3. Porovnejte vzájemné výhody a nevýhody těchto povlaků při použití v praxi.
4. Prostudujte možnosti použití nanočástic v těchto povlacích.
5. Zpracujte technickou zprávu v rozsahu minimálně 25 stran.

Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, M.: *Technologie povrchových úprav kovů*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 2006. 3. vydání. 156 s. ISBN 80-248-1217-7.

BURAKOWSKI, T., WIERZCHOŃ, T.: *Surface Engineering of Materials*. CRC Press LLC, 1999. 592 s. ISBN 0-8493-8225-4.

PODJUKLOVÁ, J.: *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 1994. 1. vydání. 71 s. ISBN 80-7078-235-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**


Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry






prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

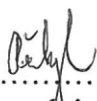
V Ostravě 17.5.2011


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠ-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 17.5.2011


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Radek Přikryl

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Oborník 547/17, 789 01 Zábřeh

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PŘIKRYL, R. *Studie povlaků PVD a CVD a jejich aplikace v praxi : bakalářská práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 35 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Bakalářská práce se zabývá studií povlaků PVD a CVD a jejich aplikací v praxi. V úvodu seznamuje s historií povlakování. Dále jsou uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých metod, jejich charakteristiky a oblasti jejich použití. Součástí práce je i vlastní experiment, který srovnává metody povlakování z hlediska trvanlivosti povlakovaných vyměnitelných břitových destiček.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PŘIKRYL, R. *Study of the Coatings PVD and CVD and their Application in Practise : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2011, 35 p. Thesis head: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Master thesis is dealing with study of the coatings PVD and CVD and their application in Practise. In the introduction acquaints with the history of the coatings. It further mentions the advantages and disadvantages of different methods, their characteristics and their field of application. Part of study is its own experiment to compare methods in terms of rating durability of coating exchangeable cutting tips.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Úvod	8
1 Historie povlakování	9
2 Metody povlakování řezných nástrojů	12
2.1 Charakteristika metody CVD.....	13
2.2 Charakteristika metody PVD	15
2.3 Využití, výhody a nevýhody metod CVD a PVD	16
3. Technologická příprava nástroje před povlakováním	17
3.1 Standardní metody úprav nástrojů před povlakováním.....	19
3.1.1 Odmaštění	19
3.1.2 Mokré čištění	19
3.1.3 Otryskávání.....	20
3.1.4 Odjehlení	21
3.1.5 Stripping	21
4. Povlakovací proces.....	23
4.1 Metoda CVD.....	23
4.2 Metoda PVD	25
5. Experimentální část – analýza trvanlivosti řezných nástrojů.....	27
5.1 Zkouška trvanlivosti jednotlivých povlaků na typu VBD	28
5.2 Stanovení řezné rychlosti při dosažení trvanlivosti 30 minut VBD typu SPKN12 ...	31
Závěr.....	32
Seznam použité literatury	34

Seznam použitých zkratek a symbolů

CVD	Chemical Vapour Deposition – chemické napařování
PACVD	Plasma Enhanced CVD – plazmaticky aktivovaná CVD metoda
MTCVD	Middle Temperature CVD – středně-teplotní CVD metoda
PVD	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
HM	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička
HSS	rychlořezná ocel

Úvod

Současné výrobní provozy jsou vybaveny CNC stroji a obráběcími automaty pracujícími ve vysokořezných podmínkách. Stroje provádí automatické změny souvisejícími s nastavením nástrojů, chlazením a synchronizací výrobních operačních postupů. Tato skutečnost klade velký důraz na výběr nástrojů, které musejí být vysoce spolehlivé, cenově přístupné a efektivní.

Rychlé opotřebování řezných nástrojů by znamenalo prostoje způsobené změnou nástrojů, výrazné snížení produktivity práce a nevyužití drahého výrobního provozu na plnou kapacitu. Poškození nástroje v téměř ukončeném výrobku by zase ohrozilo investice vložené do výroby, jako je lidská práce, stroje, materiál a čas. Proto je nezbytné sladit stroje, nástroje a výrobní podmínky tak, aby se zvýšila produktivita a snížila zmetkovitost.

Zvýšení produktivity je možné dosáhnout většími řeznými rychlostmi zkombinovanými s vhodnými posuvy a hloubkami řezu. Řezné podmínky v kombinaci s třením mezi nástroji a obrobkem vyvolávají velké koncentrace tepla na řezné hraně a také na celé straně nástroje, což je jednou z hlavních příčin nástrojového opotřebení. Jedním z velmi úspěšných opatření proti těmto nepříznivým jevům byl vývoj tvrdých otěruvzdorných povlaků na ochranu nástrojových povrchů.

V současné době se využívá převážně dvou technologií povlakování – metoda fyzikálního povlakování - Physical Vapour Deposition (PVD), kterou lze použít i pro povlakování nástrojových ocelí, a metoda chemického povlakování - Chemical Vapour Deposition (CVD) pro povlakování karbidů. Tyto metody jsou založeny na principu nanášení povlakového materiálu za účelem zvýšení tvrdosti, odolnosti proti otěru, zlepšení fyzikálních a chemických vlastností povrchové vrstvy nástroje a tím související zvýšení životnosti nástroje. Další metody se stále vyvíjejí, např. metoda PA CVD, MT CVD. Ve své bakalářské práci se zaměřuji na první dvě nejvyužívanější metody – PVD a CVD.

1 Historie povlakování

V historii řezných nástrojů vždy byla snaha vyvinout nástroje s obohacením tvrdé látky pro zlepšení otěruvzdornost. Jeden rakouský patent z roku 1963 popisuje použití destičky z vysoce otěruvzdorného tvrdokovu, která byla naletovaná na relativně houževnatý tvrdokov.

V Rusku bylo v 50. letech vyvinuto nanášení tvrdokovu na ocelové nástroje najiskřováním z tvrdokovových elektrod. V roce 1953 byl popsán v patentové literatuře způsob vylučování titankarbidu a titannitridu na ocel prostřednictvím chemické reakce z plynných směsí při zvýšené teplotě. Tyto výsledky byly popsány v roce 1957, kdy bylo pozorováno, že přirozenou křehkost takových vrstev tvrdých látek je možné potlačit snížením tloušťky vrstvy. Cílem těchto prací byla úspora tvrdokovu, resp. drahých legovacích prvků z oceli. V tomto období ještě nebylo zjištěno, že výhody povlaků tvrdých látek jsou zvláště zřetelné teprve při velmi tlakově odolné podložce z tvrdokovu nebo tvrzené rychlořezné oceli. [1]

Výroba tvrdokovů s povrchově nižším obsahem Co, resp. vysokým obsahem směsného karbidu plněním lisovacího nástroje tvrdokovovými prášky různého složení a dosažení tak vysoké tvrdosti a otěruvzdornost v oblasti řezné hrany, nemělo vždy požadovaný efekt.

V 60. letech přinesla firma Wimet Ltd. z Velké Británie na trh tímto způsobem vyráběné vyměnitelné destičky pod označením „laminated tips = laminované destičky“, které měly na povrchu ploch 0,3 – 0,6 mm tlusté vrstvy tvrdokovu obohaceného TiC-Ta(Nb)C s nižším obsahem Co na jádru z houževnatějšího tvrdokovu. Řezné hrany byly však citlivé na vydrolování z důvodu velké tloušťky otěruvzdorné vrstvy. [1]

Rozhodující průlom ve vývoji přineslo v letech 1967 – 1969 zjištění, že už od několika tisícín mm silných vrstev TiC, naneseného na tlakově pevnou tvrdokovovou podložku, se projevíly zřetelně lepší užité vlastnosti zejména při třískovém obrábění ocelových a litinových obrobků. [1]

Tento vývojový krok tvrdou látkou povlečených destiček se označuje často jako „první generace“. Vyznačoval se výskytem eta-fáze v přechodné oblasti mezi asi 3 – 5 μ silnou vrstvou TiC a základním tvrdokovem. Zkřehnutí eta-fází mělo za následek zvýšenou citlivost na rázy a tlak v řezu a dávalo tak určité hranice oblasti použití takového tvrdokovu. Došlo však ke zřetelnému zvýšení výkonů proti nepovlakovaným tvrdokovům. [1]

Na počátku 70. let došlo k dalšímu vývojovému stupni povlakování, označovanému také jako „druhá generace“. Tato zlepšená technika CVD-postupů lépe ovládla uhlíkovou bilanci. Došlo k odstranění mezivrstvy obsahující eta-fázi, a tím ke zvýšení houževnatosti řezné hrany. To umožnilo zvýšení vrstvy na 6 – 7 μ a další zlepšení řezného výkonu. Vedle TiC byly jako svlakovací tvrdé látky použity TiN, Ti(C,N) a ojediněle i Al_2O_3 . [1]

Dalším vývojovým stupněm povlaků tvrdých látek, tzv. „třetí generace“, je zavedení vícefunkčních vícenásobných vrstev z různých tvrdých látek. Každá tato látka má podle svých vlastností a umístění v celkovém povlaku určité funkce. [1]

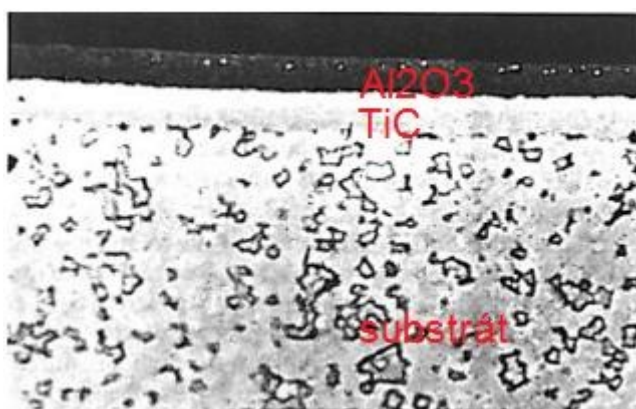
Jako první vrstva k základnímu tvrdokovu se vzhledem k dobré přilnavosti a koeficientu teplotní roztažnosti, který je nejbližší k tvrdokovu, nabízí TiC. V případě tzv. povlaků Goldmaster následují na TiC-vrstvě různé vrstvy titankarbonitridu až po vnější vrstvu TiN. Tyto vrstvy zvyšují odolnost proti kráterovému a třecímu otírání. [1]



*Obr. 1 - „Goldmaster“ -
Povlak na tvrdokovu (zvětšení 1500) [1]*

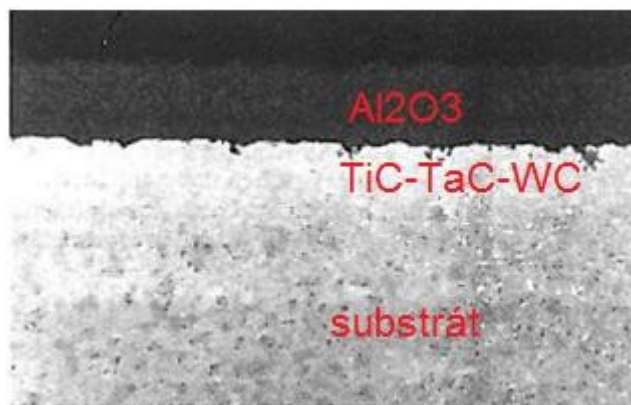
V současnosti však, zejména kvůli použitelnosti MT CVD metody, bývá základní vrstvou CVD povlaku Ti(C,N).

U jiného povlaku následuje na vrstvě TiC přímo Al_2O_3 : [1]



*Obr. 2 – TiC- Al_2O_3 –
Povlak na tvrdokovu (zvětšení 1500x) [1]*

V jiné variantě je vrstva Al_2O_3 vyloučená na vrstvě směsných krystalů TiC-TaC-WC prakticky bez pojícího kovu: [1]



Obr. 3 – Al_2O_3 –
Povlak na tvrdokovu (zvětšení 1500x) [1]

Tento typ povlaku je použitelný jen u dokončovacích operací za vysokých řezných rychlostí.

Zvlášť dobré se ukázaly tzv. povlaky Starmaster, které mají na vrstvě titankarbidu vrstvu titankarbonitridu a na ní tenké keramické vrstvy na bázi Al_2O_3 , které se střídají s TiN. Celá tloušťka vrstvy je asi 8 μm , z čehož připadá na TiC a Ti(C,N) asi 4 μm a na keramické vrstvy také 4 μm . [1]



Obr. 4 – „Starmaster“ –
Povlak na tvrdokovu (zvětšení 1500x) [1]

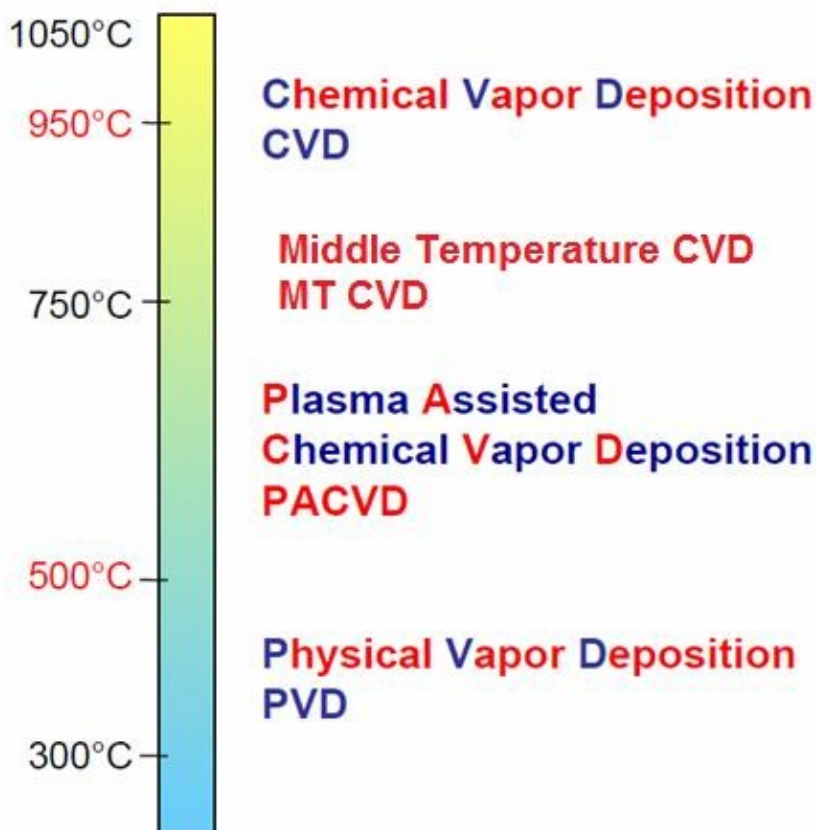
Rozdělením povrchu tvrdých látek na větší počet velmi tenkých vrstev došlo ke zlepšení houževnatosti. Můžeme to vysvětlit laicky na příkladu srovnání skleněné desky a skleněné vlny: Křehké látky ve formě jemných vláken nebo velmi jemných vrstev je možné tvarovat bez zlomení. Takto se mohou také tenké vrstvy tvrdých látek o mnoho snadněji elasticky a plasticky přetvářet během třískově-obráběcího procesu bez nebezpečí

otěru nebo vydrolení. Zkušenost ukazuje, že přetvářitelnost vícenásobného povlaku je výrazně lepší než jednoduchá vrstva stejné tloušťky.

Na základě svých lepších vlastností pokud se jedná o houževnatost, je celková tloušťka vícevrstvého povlaku většinou větší svými 8-10 μm než u vrstev jednoduchých.

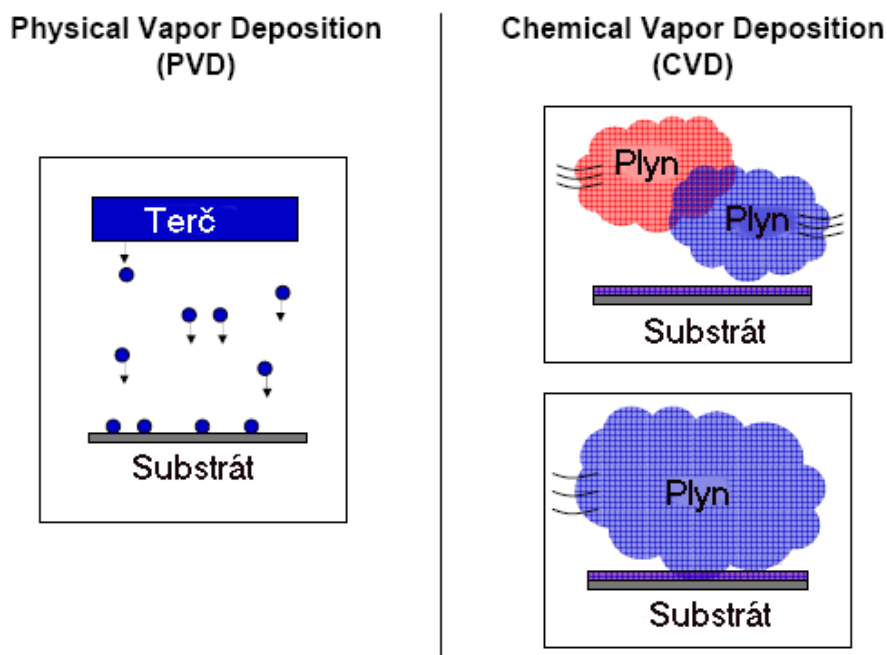
2 Metody povlakování řezných nástrojů

Pro povlakování řezných nástrojů se používají v principu zejména 2 metody. Jsou to metody: CVD (Chemical Vapour Deposition) a PVD (Physical Vapour Deposition). Metoda CVD využívá pro depozici směs chemicky reaktivních plynů (např. TiCl_3 , CH_4 , AlCl_3 , apod.) zahřátou na poměrně vysokou teplotu 950 – 1050 $^{\circ}\text{C}$. PVD technologie je založena na fyzikálních principech – vakuové napařování nebo vakuové naprašování materiálů obsažených v povlaku (Ti, Al, Si, Cr aj.), ionizaci a jejich následném nanesení na nástroje při teplotách nižších než 500 $^{\circ}\text{C}$. [3]



Obr. 5 - Depoziční procesy [3]

Za hlavní charakteristický rozdíl mezi těmito metodami je brán způsob přípravy vrstvy, tj. z pevného terče u PVD metod a z plynu u CVD metod.



Obr. 6 - Schéma tvorby povlaků metodou a) PVD, b) CVD [3]

2.1 Charakteristika metody CVD

Chemické metody nanášení povlaků ve vakuu CVD vycházejí z principu vzniku chemických sloučenin přiváděných v plynném stavu k povrchu povlakovaného předmětu. Jedná se o soubor chemických reakcí v plynné fázi a na rozhraní plynné a pevné fáze za určitého tlaku a současného dodávání energie. Při tom vznikají vedle pevných látek i těkavé produkty, které je nutné odstraňovat. Významnou úlohu mají absorpční jevy, především chemisorpce. Nukleací a růstem tuhé fáze se připravují povlaky z tvrdých, vysokotavitelných sloučenin, jako jsou např. TiN, TiC, TiCN, TiB₂, Al₂O₃ atd. Povlaky mají většinou tloušťku 3 až 25 μm na slinutých karbidech pro zlepšení tření nebo opotřebení. [5]

CVD metoda má mnoho modifikací, z nichž některé jsou významné tím, že výrazně snižují pracovní teplotu procesu. Jednou z nich je metoda PA CVD – plazmaticky aktivovaná CVD metoda. Pracovní teploty u této metody jsou pod hranicí 600 °C při zachování základního principu depozice z plynné fáze. PA CVD metoda využívá zvýšení energie plynné atmosféry její ionizací plazmovým výboje, který doutná v komoře reaktoru. Chemicky aktivovaná plazma umožňuje snížení teploty ukládání povlaku na povrch substrátu. Plazma se vytváří reaktivním plynem (např. NH₃) nebo vnějším elektrickým

napájecím zdrojem (střídavé napětí s nízkou nebo vysokou frekvencí, stejnosměrné nebo stejnosměrné pulzní napětí). [3]

Další metodou, která je založena na principu snížení vysokých pracovních teplot CVD metody, je tzv. MTCVD metoda (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition). Na rozdíl od konvenční CVD technologie, kde teploty nanášení povlaků dosahují hodnot nad 950 - 1050 °C, umožňuje technologie MTCVD nanášet povlaky z plynné fáze za teplot podstatně nižších, 700 - 850 °C. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH_4 (zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN) nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl_4). Rychlost růstu vrstvy TiCN je u metody MTCVD přibližně třikrát vyšší než u klasické vysokoteplotní CVD metody. Mezi hlavní výhody MTCVD metody patří skutečnost, že v důsledku nižší reakční teploty nedochází k poklesu houževnatosti podkladového slinutého karbidu a břitové destičky jsou odolnější proti mechanickým rázům a mohou být použity při vyšších hodnotách posuvových rychlostí. Ze stejného důvodu lze též vyrábět břitové destičky s většími kladnými úhly čela (a tedy menšími úhly břitu) bez rizika, že by při jejich použití v přerušovaném řezu docházelo k vylamování ostří. [4]

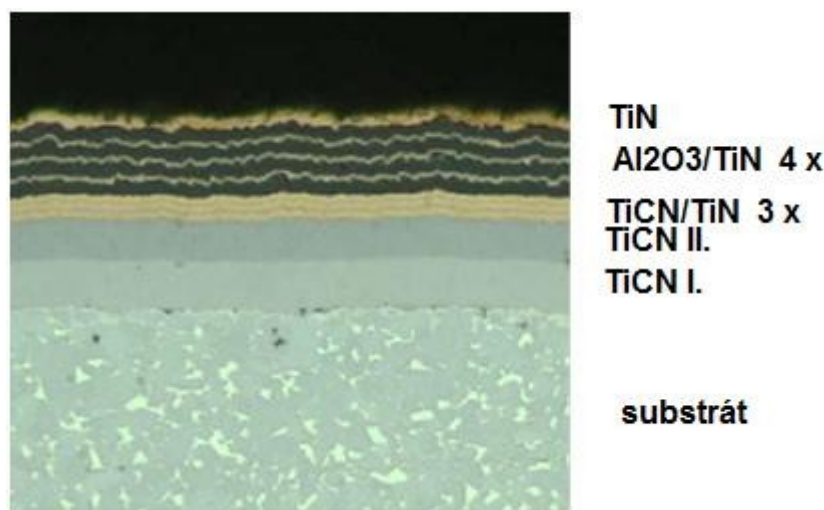
Hlavní aplikace je v elektronice a v ochranných vrstvách. Ve zmíněných řezných aplikacích jsou významně zastoupeny u vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu. Jinak je jejich použití v této oblasti omezeno právě vysokou teplotou depozice, která negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti povlakovaných substrátů.

Velmi často používanými povlaky jsou vrstvy typu TiCN, které mají oproti nejčastěji používaným vrstvám TiN nižší koeficient tření a lepší tepelnou vodivost. [6]

V případech, kdy je aplikace CVD povlaků z rozměrových hledisek možná, je kvalita povlaků TiCN nanášených touto technologií zcela bezkonkurenční. Zejména v případech extrémního namáhání nástrojů při výrobě strojních dílů z vysocepevných materiálů lisováním a tvářením. Pro další zlepšování kvality těchto povlaků, zejména jejich koeficientu tření, jsou vyvíjeny další varianty těchto povlaků. [6]

Používají se i povlaky sendvičového typu, kdy na povrch nástrojů s povlakem TiCN (CVD) je nanášena kluzná vrstva (např. PVD), která je do krystalové struktury povlaku velmi dobře zakotvena. Konečným efektem je několikanásobné zvýšení životnosti nástrojů v těch aplikacích, kde je rozhodující koeficient tření. [6]

Mezi obecné výhody povlakování CVD metodami patří vysoká hustota a tepelná stabilita povlaku, jeho vysoká homogenita a vynikající přilnutí k podkladu a precizní řízení složení jednotlivých složek multivrstev.



Obr. 7 - CVD povlak na substrátu (zvětšení 1500x) [3]

2.2 Charakteristika metody PVD

Základním principem fyzikálních metod nanášení povlaků ve vakuu – PVD je převedení pevného kovu (např. titan) do plynného stavu a jeho kondenzace na povlakovaném substrátu v kombinaci se zředěnými plyny. [5]

Podle způsobu převedení pevné komponenty do plynného stavu rozlišujeme následující metody PVD: [5]

- **vakuové napařování**, přičemž odpařování materiálu se děje:
 - klasickým elektrickým obloukem
 - nízkonapětovým elektrickým obloukem
 - elektronovým svazkem
 - laserem
- **vakuové naprašování**, které se dělí na:
 - katodové
 - magnetonové
- **iontové plátování** vychází z libovolného způsobu napařování či naprašování, ale substrát je navíc bombardován atomy s vyšší energií. Atomům deponovaného kovu lze tuto energii dodat např. vložením pomocného napětí na substrát.

Jedná se o nejekologičtější metodu, jelikož při deponování se neužívá žádný nebezpečný materiál a nedochází k uvolnění toxických látek. Původně se tímto procesem povlakovaly nástroje z rychlořezných ocelí (HSS), které nebyly díky nízkým pracovním teplotám tepelně ovlivněny. V poslední době se tato aplikace užívá i u slinutých karbidů, zejména frézovacích (přerušovaný řez). [6]

V oblasti povlakování řezných a tvářecích nástrojů patří napařování pomocí nízkonapětového oblouku k metodám nejfrekventovanějším. Důvodů je několik. Nízkonapětový oblouk je výhodný pro svoji relativně vysokou rychlost napařování materiálu elektrod a současnou vysokou ionizaci plazmatu. Díky tomu se obloukové technologie v průmyslovém měřítku řadí technologiím poměrně časově nenáročným. Délky procesů se pohybují v řádu několika málo hodin. Vysoká ionizace plazmatu zase přináší možnosti přípravy povlaků a struktur běžně se v přírodě nevyskytujících.[6]

Nejčastějšími typy PVD povlaků podle složení jsou TiN (dříve), později (Ti,Al)N, multivrstvy (TiAlN)/TiN, nitridy dalších prvků (Ti, Al, Cr, Si)N a kombinace, dále i kombinace (TiAlCrSi) (N,O,C). Nejvyspělejší firmy dnes už jsou schopny vytvářet kombinace s (C, N) a dokonce i Al_2O_3 .



Obr. 8 - PVD povlak na substrátu (zvětšení 1500x) [3]

2.3 Využití, výhody a nevýhody metod CVD a PVD

V důsledku rozdílů ve vlastnostech jsou CVD vrstvy využívány především pro soustružení a frézování, zatímco PVD vrstvy jsou užívány tam, kde by byla trvanlivost v důsledku vydrolování a vysokých řezných sil nízká, např. při obrábění korozivzdorných ocelí. Vrstvy PVD jsou též užívány u nástrojů, které mají velmi pozitivní geometrii ostří (bez zaoblení), jako např. celokarbidové vrtáky a stopkové frézy. [4]

Výhody metody CVD:

- ✓ vysoká teplotní stabilita vytvořených vrstev,
- ✓ možnost vytvářet poměrně složité vrstvy a to nejen nitridu kovů (Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy),
- ✓ vysoká adheze vrstev a odolnost proti opotřebení, rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí,
- ✓ nízké náklady na zařízení a řízení procesu – vhodnost pro velkovýrobu i střední výrobu.

Nevýhody metody CVD:

- vysoká energetická náročnost,
- dlouhý pracovní cyklus 8 - 12 hodin,
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi,
- tahová pnutí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti),
- eventuální chemické ovlivnění substrátu, což vedlo k vývoji povlaků MT CVD.

Výhody metody PVD:

- ✓ vysoká odolnost vrstev,
- ✓ nízký koeficient tření,
- ✓ možnost vytvořit velké množství různých kombinací vrstev, přesných tloušťek vrstev, až po nanovrstvy, např. 2000 vrstev/ 3 μm
- ✓ ekologicky nejšetrnější metoda depozice vrstev.

Nevýhody metody PVD:

- komplikovaný vakuový systém povlakovacího zařízení,
- nutnost důkladného odmašťování a čištění povrchu před povlakováním,
- směrový účinek povlakování – nutnost neustálého pohybu povlakovaných předmětů při povlakování.

3. Technologická příprava nástroje před povlakováním

Vliv různých mezioperačních úprav nástrojů, případně vedlejší vlivy samotných technologií výroby nástrojů mají zásadní vliv na úspěch povlakovaného substrátu.

Ve zjednodušeném příkladu výroby řezných nástrojů lze vysvětlit některé podstatné technologické jevy, které mají na funkci nástrojů významný vliv. Zjednodušený výrobní

cyklus zahrnuje „výběr materiálu nástroje – vybroušení nástroje – následná úprava nástroje před povlakováním“.

Výběr materiálu nástroje má zásadní význam pro rozhodnutí jaké úpravy před povlakováním budou požity a jaká PVD technologie se zvolí. Podstatný rozdíl je především při volbě nástrojů z HSS či slinutého karbidu (HM). Rozdíly jsou v odolnosti zmíněných materiálů vůči vysokým teplotám, vůči chemickým procesům a vůči abrazivnímu otěru. Proto se volí jiné chemické metody v případě stahování starých povlaků a v mokrém čištění, volí se jiné metody mechanických úprav před povlakováním – kartáčování, omílání apod. a volí se jiné svlakovací teploty – u HSS do 450 °C, u HM do 600 °C. Sortiment např. HM materiálů je dnes velmi široký a vlastnosti jednotlivých typů HM jsou velmi rozdílné. I tomuto faktoru se musí přizpůsobit technologie chemických úprav nástrojů a případně i fáze iontového čištění nástroje již ve fázi cyklu povlakování. [7]

Vybroušení nástroje resp. technologie broušení zahrnující stroj, brusný nástroj, chladicí kapalinu a způsob broušení, může ovlivnit následnou operaci povlakování, ale i kvalitu samotného nástroje bez vlivu povlakování. Z pohledu vazby na následné povlakování nástroje lze hovořit o kvalitě broušeného břitu, o kvalitě broušených ploch a o historii veškerých povrchových vlivů během výroby. Tím je míněn vliv chladicích kapalin, obrusů případně následné konzervace. Z praktických důvodů je však znalost „historie nástroje“ v svlakovacích centrech malá, a proto se musí volit následné čistící procesy univerzálně. To klade velké nároky především na mokré metody čištění. [7]

Kvalita břitu a broušených ploch je z pohledu povlakování velmi důležitá pro dobrou adhezi vrstvy. Pokud má břit či povrch ostré nerovnosti, dochází na nich k odlupování vrstev. Tento negativní jev lze eliminovat mechanickou úpravou břitů a povrchů. U HSS materiálů se jedná o prakticky běžné odjehlení, u HM materiálů lze hovořit o „rektifikaci“ břitů. Některá abraziva však mají velmi negativní vliv na následnou adhezi povlaků. Některé „nosiče“ jako např. plasty ulpívají v mikroskopických částech na nástroji a nelze je následnými běžnými čistícími metodami odstranit. Proto i vhodná volba abrazivního media a jeho nosiče jsou z pohledu povlakování zásadní. [7]

Úprava nástrojů před povlakováním zahrnuje i běžné mokré čištění nástrojů a etapy fyzikálního iontového čištění v samotném PVD procesu. Součástí standardního čištění některých HM nástrojů je i otryskávání nebo jiná mechanická úprava, která má za cíl odstranění nečistot, ve zdokonalené formě i úpravy břitů. Všechny tyto standardní postupy

mají za úkol zvýšit adhezi povlaků na nástrojích. V některých případech se volí i následná mechanická úprava po povlakování, která má za cíl snížit drsnost povrchu. [7]

3.1 Standardní metody úprav nástrojů před povlakováním

3.1.1 Odmaštění

Odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů se provádělo klasiky pomocí benzínu a petroleje. Dnes jsou tyto neekologické a nehygienické látky nahrazeny průmyslovými odmašťovacími opěť na bázi ropných derivátů, ale s vlastnostmi odpovídajícími přísným ekologickým normám. Odmašťovací prostředky obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy bránící nadměrnému odpařování a zajišťujícími dobrou smáčivost. Odmaštění se provádí v běžně dostupných jednoduchých odmašťovacích zařízeních podle kapacitních potřeb či velikosti nástrojů. [8]

Existují i mnohóláznové mycí linky s počítačově řízenou sekvencí několika různých mycích lázní, spojující odmaštění a mokré čištění – mytí.

3.1.2 Mokrý čištění

Jedná s o kombinované metody využívající oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení resp. odstředění resp. vyhřátí resp. odpaření těkavých kapalin.

Jako průmyslová zařízení jsou využívány mycí linky s několika samostatnými mycími a splachovacími vanami případně jednovanové systémy s automatickou výměnou jednotlivých technologických lázní. Používají se většinou kapalné čisticí prostředky, které se dávkovacím čerpadlem dodávají přímo do mycí lázně. Čištění probíhá v alkalickém prostředí – nejběžnější je čištění v roztocích obsahujících KOH či NaOH. Pro zvýšení odmašťovacího účinku mohou být kombinovány s malými přísadami tenzidy (smáčedel), popř. i kyseliny citronové či fosforečné. [8]

V některých případech čisticí linky kombinují v oddělených nádobách zásadité a kyselé prostředí, tím se může dosahovat vyššího čisticího účinku. Veškeré čisticí lázně se provádí v roztocích s demineralizovanou vodou.

Po takto provedeném čištění následují oplachy, které však musí jak odstraňovat zbytky čisticích lázní, tak i chránit očištění povrch proti korozi pasivátorem. Pro účely povlakování nejlépe vyhovují pasivátory s krátkou dobou působení do 2 dnů. Pasivátory se kombinují s oplachovými lázněmi, u nichž je naprosto nezbytné minimalizovat obsahy solí

a jiných rozpuštěných látek ve vodě. Proto je nutné používat velmi čisté oplachové vody. Vodivost používaných demineralizovaných vod by se měla pohybovat v řádu desetin $\mu\text{S}/\text{cm}$. Takto zvolené prostředky krátkodobé ochrany nesmí negativně působit na adhezi připravovaných vrstev. Pasivátory mohou obsahovat neionogenní tenzidy, organické soli a alkoholy. [8]

Pro zajištění kvalitního povrchu bez zbytkových „map“ je potřeba dosáhnout rychlého osušení smáčených povrchů. K tomu jsou používány různé metody založené na odstředivé zbytkové kapalině, na odpaření zbytkové kapalině na vzduchu či ve vakuu. [8]



Obr. 9 - Průmyslová myčka – oplachový systém [7]

3.1.3 Otryskávání

Otryskávání je vhodná průmyslová metoda pro případ sériové výroby vhodných substrátů nebo pro speciální případy. Lze jím odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu případně i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu. To jsou případy nebroušených slinovaných ploch HM materiálů nebo opotřebovaných a neobnovených ploch přebroušovaných nástrojů. Jako vhodné medium se používá abrasivo SiC nebo Al_2O_3 . Některá běžně používaná media nejsou vyloženě vhodná, protože jejich rezidua negativně ovlivňují adhezi povlaků. Velikost abrazivních zrn se pohybuje v nízkých hodnotách 20 až 100 μm . [7]

Technologie otryskávání musí vždy respektovat charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy. Proto i volba parametrů otryskávání a řešení automatizace procesu jsou záležitostmi do značné míry empirickou. Bez dlouhodobých seriálních experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům – nevhodné zaoblen hran, otryskání měkkých fází (pájené nástroje) nebo zmatnění zrcadlových dekorativních či upínacích ploch. [7]

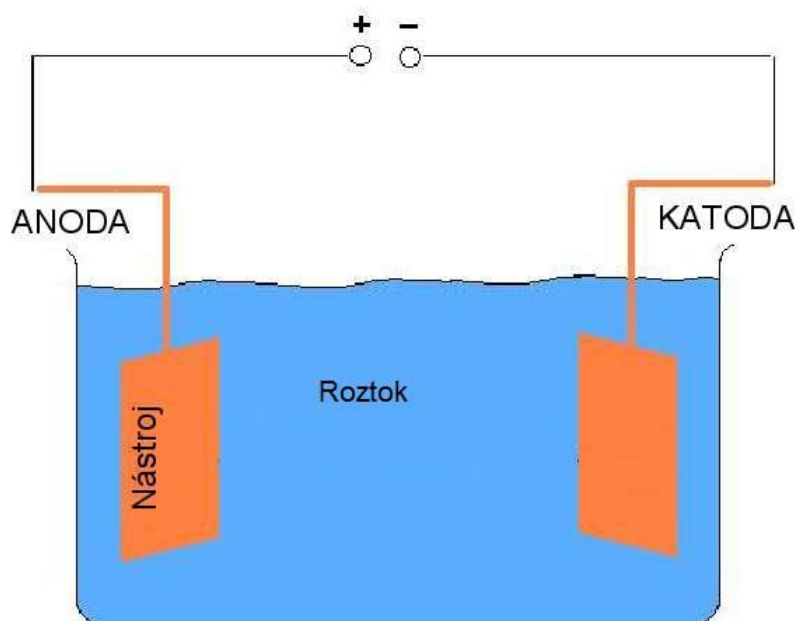
Dnes dokonalé otryskávací systémy umožní i řízené zaoblování břitů, zvláště u složitých tvarů VBD, kde nevyhovují ani pružné kotouče či kartáče.

3.1.4 Odjehlení

Odjehlení především nástrojů z HSS je standardní postup aplikovaný přímo výrobcí nástrojů. Používá se kartáčování nebo ruční odjehlení. V případě následného povlakování je však třeba dodržet určité limitující podmínky. Nevhodné jsou např. kartáče s plastovým vlasem (nosičem abraziva), případně některé mosazné kartáče. Vhodná volba kartáčů je opět záležitostí do značné míry empirickou. Ruční odjehlení pomocí pilníků nebo různých tkanin s abrazivy je značně individuální technologie s vysokým kolísáním reprodukovatelnosti. Je vhodné volit i metodu omílání, která je popsána dále. [7]

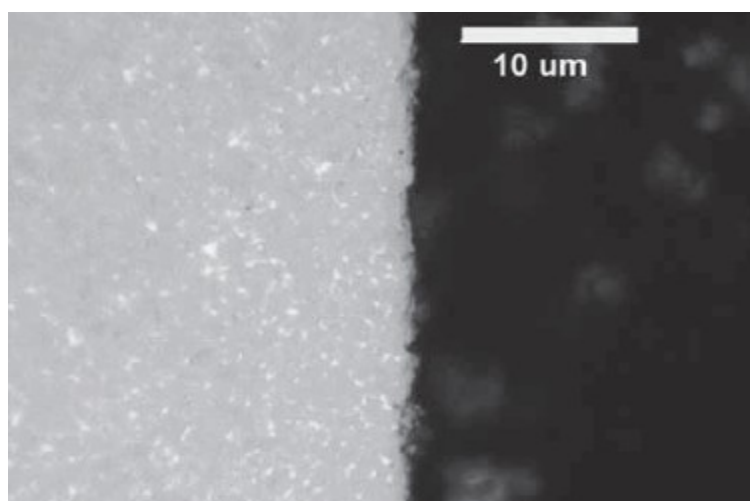
3.1.5 Stripping

Jedná se o stahování starých povlaků u přebrušovaných nástrojů. Existuje výrazný rozdíl v používaných technologiích pro nástroje z HSS a HM. Stripping je prováděn chemickou a elektrochemickou cestou a využívá silných oxidačních činidel, popř. účinku elektrického proudu. Pro odstraňování povlaků z nástrojů z HSS se nejčastěji používá roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu. Provádí se za teploty kolem 70 °C. Z průmyslového pohledu je důležitý fakt, že se jedná o reakci s horkým peroxidem. Bezprostředně po provedeném strippingu je nutné povrch jak opláchnout, tak i krátkodobě pasivovat vhodným činidlem. [7]

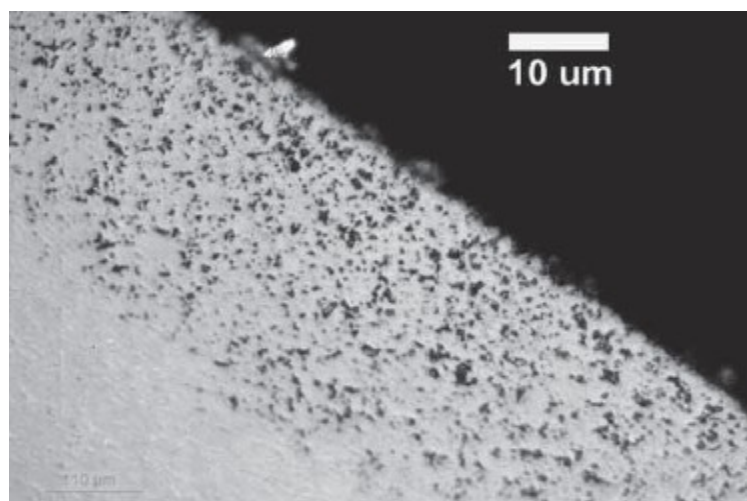


Obr. 10 - Stripping elektrochemickou cestou [9]

Samozřejmě existují alternativní postupy včetně zmíněné elektrochemické metody. Odstraňování povlaků z HM nástrojů je v zásadě mnohem komplikovanější technologií. Nevhodně volená technologie může způsobit narušení struktury materiálu vyleptáním kobaltu ze struktury. To je také nejzásadnějším problémem této technologie. Kobalt, jehož obsah v HM se běžně pohybuje mezi 6 – 12 %, reaguje velmi citlivě na kyselé či zásadité prostředí. Naleptání kobaltu do hloubky 5 μm způsobí vážné problémy při následném povlakování i použití nástrojů. Také pro tuto technologii je využíván peroxid vodíku ovšem ve výrazně nižších koncentracích a většinou za pokojové teploty. Jako alternativní metody se opět někdy používá stropování ovlivněné účinkem elektrického proudu. [7]



Obr. 11 – kvalitní stripping [7]



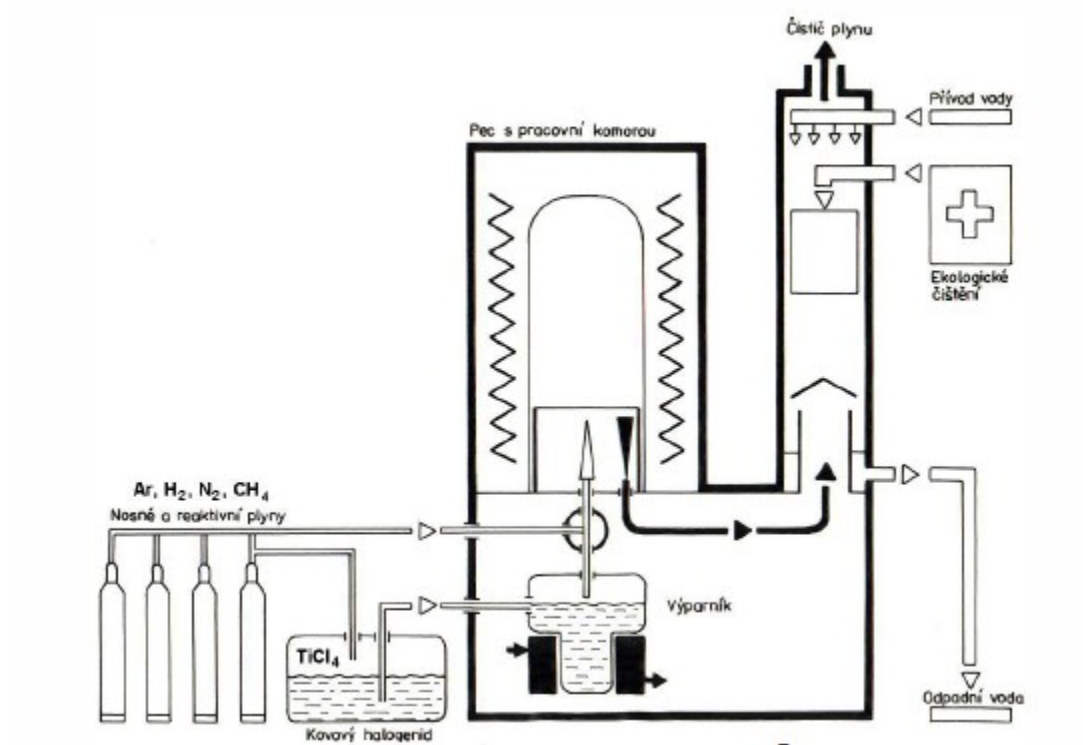
Obr. 12 – nekvalitní stripping – hloubkové odleptání kobaltu [7]

4. Povlakovací proces

4.1 Metoda CVD

CVD proces může být definován jako proces, ve kterém jsou plynné složky, aktivované klasicky tepelně (CVD) nebo jinak (např. plazma, laser PA CVD atd.), zapuštěny do reakční komory do těsné blízkosti substrátů tak, aby reagovaly a tvořily pevný povlak na povrchu těchto substrátů. [11]

Jedná se o chemický povlakovací proces, při kterém dochází na podložce k reakcím chemických sloučenin, které jsou v plynném stavu přiváděny k substrátu. [11]

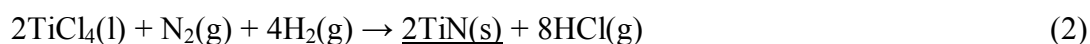


Obr. 13 - Schéma CVD povlakovacího zařízení [11]

Probíhající chemické reakce při nanášení TiC, TiN a TiCN: [11]



- vylučování karbidu titanu



- vylučování nitridu titanu



- vylučování karbonitridu titanu

Zdrojem Ti ve výše uvedených rovnicích je kapalný chlorid titaničitý, který je zahříván na teplotu blížíci se jeho bodu varu a následně jsou jeho páry unášeny tzv. nosným plynem H_2 a metanem CH_4 do reaktoru, kde dochází k vylučování otěruvzdorné vrstvy TiC (1). Při vylučování TiN je použit obdobně chlorid titaničitý spolu s reakčním plynem dusíkem N_2 (2). Podobným způsobem dochází k vylučování karbonitridu titanu TiCN (3).

Dnes existuje i přesnější dávkování $TiCl_4$ ve formě kapaliny mikročerpádlem do směšovací komory.

Základním atributem povlakování CVD je, že chemická reakce probíhá při vysoké teplotě, zpravidla $900 - 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž pracovní tlaky v reaktoru se udržují pomocí vývěvy v rozsahu $50 - 500\text{ mbar}$. Rychlost růstu povlaku je mimo jiné úměrná tlaku v reaktoru, přičemž dochází k většímu přírůstku hmotnosti povlaku v místě kontaktu povlaku s podložkou. Tato skutečnost je vysvětlována tím, že v počáteční fázi nanášení povlaku TiC dochází k odebrání volného uhlíku ze substrátu, což ve svém důsledku vede k oduhličení slinutého karbidu a vzniku tzv. η – fáze na povrchu substrátu. Ke vzniku η – fáze dochází při teplotách nad $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obecně se dá říci, že vznik oduhličené η – fáze na povrchu substrátu těsně pod povlakem je nežádoucí, protože tato vrstva má vyšší tvrdost, což ve svém důsledku vede ke snížení houževnatosti slinutého karbidu a vede k negativním výsledkům při nasazení v přerušovaném řezu. Při kontinuálním obrábění není malé množství η – fáze na závadu. [12]

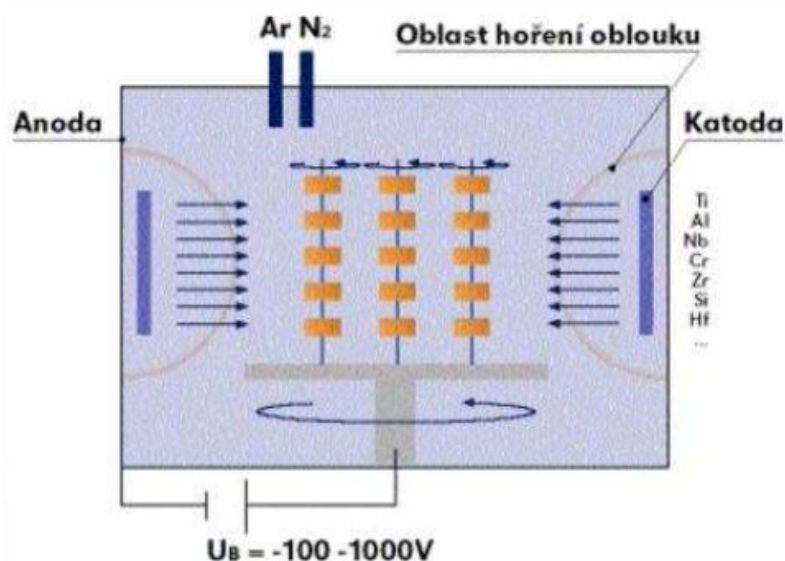


Obr. 14 - CVD povlakovací zařízení BERNEXTM BPX [15]

4.2 Metoda PVD

Vytváření povlaku metodou PVD probíhá za velmi nízkého tlaku dopadajícími částicemi, které se uvolňují ze zdroje částic (terče). Podle fyzikální metody uvolňování částic se povlaky mohou tvořit vakuovým naprašováním, napařováním nebo iontovým plátováním. Uvolněné a ionizované částice reagují s atmosférou povlakovací komory tvořenou inertním a reaktivním plynem (např. argonem a dusíkem). Současně jsou záporným předpětím (v řádu stovek voltů) urychlovány k povlakovanému povrchu. Povlak je vytvářen jednotlivými dopadajícími atomy, které postupně vytváření spojující se zárodky a ostrůvky, až vytvoří souvislou vrstvu. [13]

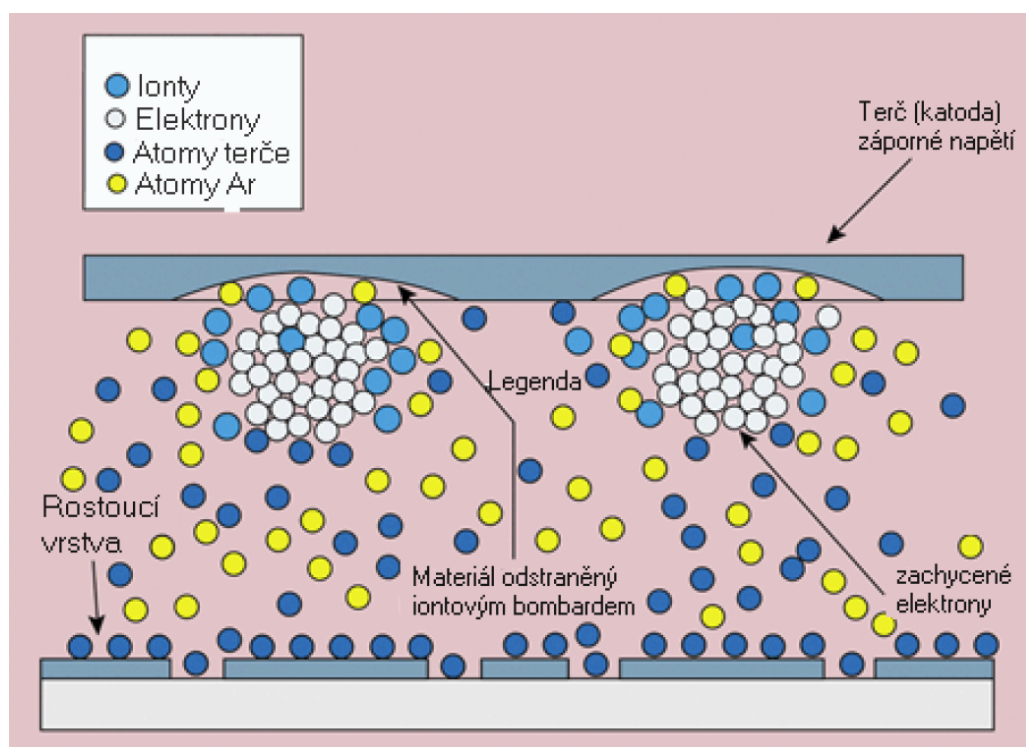
Schéma PVD povlakovacího zařízení ukazuje následující obrázek:



Obr. 15 - Schéma PVD povlakovacího zařízení [15]

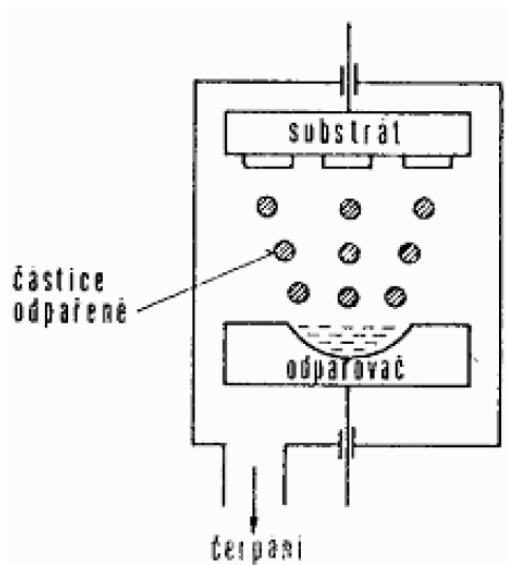
Naprašování je depozice částic uvolněných z povrchu zdroje rozprašováním. Naprašovací zařízení se skládá z katody vyrobené z materiálu, který je nanášen (zdroj částic), držáku povlakovaných nástrojů či VBD, odprašovacího plynu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie. Nad katodou se prostřednictvím elektrického výboje udržuje ionizovaný argon, jehož kladné ionty urychlené elektrickým polem bombardují povrch katody a svojí kinetickou energií vyrážejí – odprašují – jednotlivé částice (atomy nebo molekuly). Ty se následně usazují na povrchu substrátu a vytvářejí povlak. [13]

Mezi hlavní nevýhody naprašování patří nízká intenzita depozice (ve srovnání s dále popsaným napařováním), nutnost chlazení terče (většina energie dopadajících částic se mění v teplo) a velké vnitřní napětí v takto vytvořeném povlaku. Naopak hlavní výhody spočívají zejména v možnosti odprašovat prvky, chemické sloučeniny i slitiny, ve vysoké životnosti katody a také v tom, že depoziční komora může mít velmi malý objem. [13]



Obr. 16 - Vakuové napařování [3]

Při *napařování* je kov z terčů odpařován v poměrně vysokém vakuu (10^{-3} až 10^{-8} Pa) odporovým ohřevem, elektrickým obloukem, elektronovým paprskem nebo laserem. Emitované částice reagují s atmosférou povlakovací komory tvořenou inertním a reaktivním plynem a dopadají na povrch substrátu, kde se usazují ve formě tenké homogenní vrstvy. Časté srážky emitovaných částic s částicemi inertního plynu přispívají k rovnoměrné tloušťce povlaku. [13]



Obr. 17 - Vakuové napařování [3]

5. Experimentální část – analýza trvanlivosti řezných nástrojů

V této části bakalářské práce se zaměřuji na aplikaci vrstev povlaků technologiemi PVD a CVD na vyměnitelných břitových destičkách ze slinutého karbidu (dále jen VBD).

Byly provedeny **řezné zkoušky VBD ze slinutého karbidu** v rámci jejich použití při obrábění. Cílem série zkoušek byl výběr vhodného povlaku a metody povlakování vzhledem k daným řezným podmínkám. Protože nejširší uplatnění mají povlakované VBD ve frézování, byla trvanlivost povlaků ověřena při této aplikaci.

Zkoušky byly prováděny ve firmě Pramet Tools, s.r.o. Šumperk. Tato firma aplikuje tyto vrstvy na nástroje již od 70. let minulého století metodou CVD a od 90. let minulého století také metodou PVD a podílí se svými zkušenostmi i na vývoji.

Substrátem tohoto slinutého karbidu je typ s relativně vysokým obsahem Co a dopantem – stabilizujícím činitelem (Ta, Nb) C v malém množství, který je univerzálně použitelný v obrábění pro všechny typy ocelí a litin.

U všech řezných zkoušek byly zkoušeny **2 různé typy VBD** - typy SPKN12 a APKX15. Nejprve byla zkoušena trvanlivost jednotlivých povlaků a typů VBD v minutách a následně byla stanovena řezná rychlost při dosažení trvanlivosti 30 min. u VBD typu SPKN12.

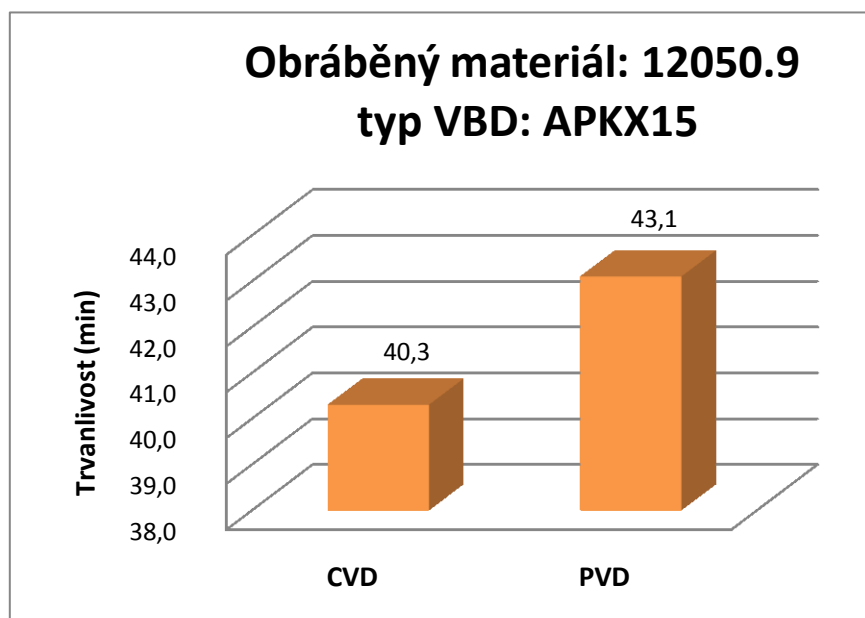
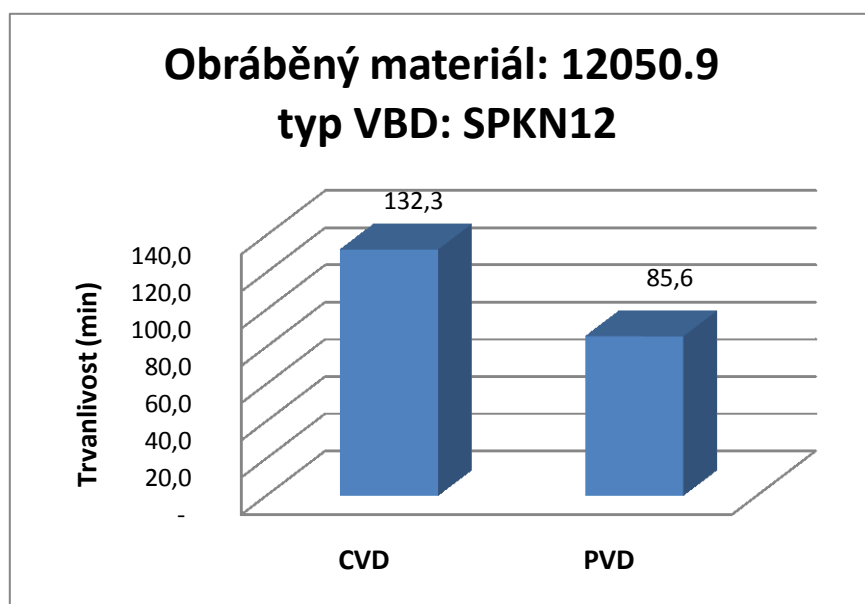
Použité typy povlaků u řezných všech zkoušek:

Povlak CVD	tenčí (frézovací) verze typu TiCN/ TiN/ Al ₂ O ₃ / TiN
Povlak PVD	nanovrstvený povlak z typů (Ti,Al)N

Pro jednotlivé operace s uvedeným substrátem nejsou tyto typy povlaků zcela optimální, ale byly voleny proto, že je lze použít na všechny obráběné materiály a mají zhruba stejnou tloušťku povlaku, což zajišťuje srovnatelné podmínky pro provedení experimentální zkoušky.

5.1 Zkouška trvanlivosti jednotlivých povlaků na typu VBD

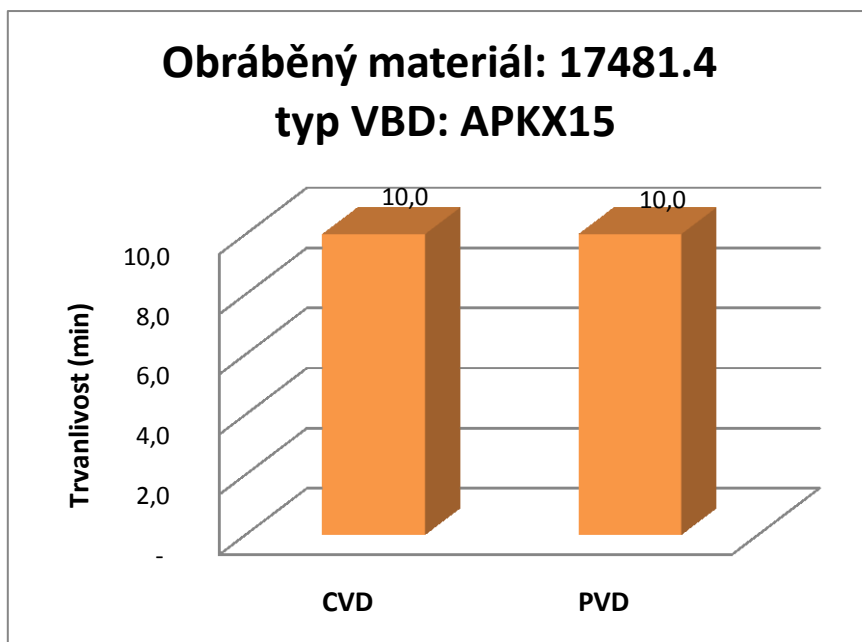
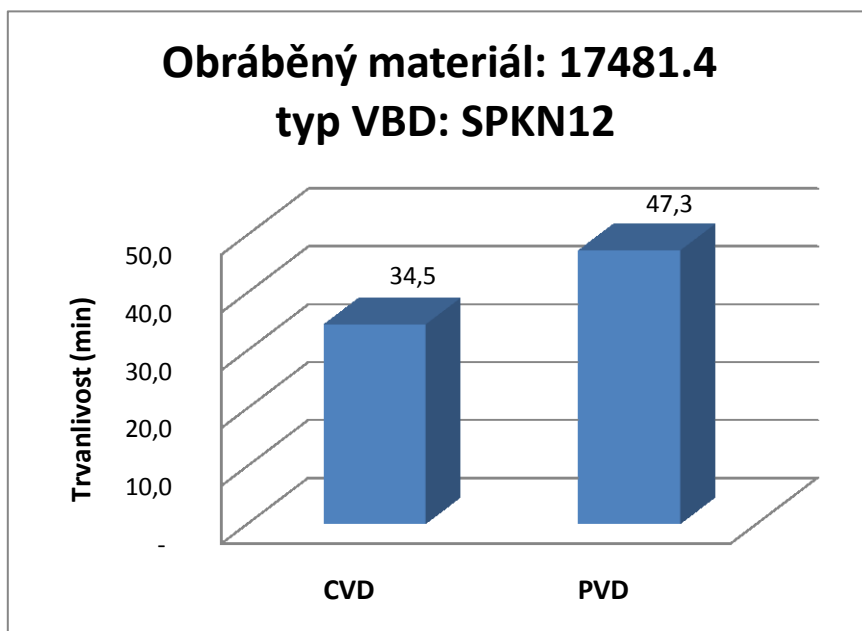
Řezná zkouška č. 1		
Obráběný materiál:	12050.9 – ušlechtilá uhlíková ocel	
Řezné podmínky:	Řezná rychlost	177 m/min
	Posuv	0,244 mm/ot
	Hloubka třísky	2,0 mm



Při první řezné zkoušce dosáhla VBD tvaru SPKN12 s povlakem CVD delší trvanlivosti než s povlakem PVD. Poměr trvanlivosti VBD s povlakem CVD k PVD byl 154,6 %.

VBD tvaru APKX15 s povlakem CVD dosáhla naopak kratší trvanlivosti než s povlakem PVD. Poměr trvanlivosti VBD s povlakem CVD k povlaku PVD činil 93,5 %.

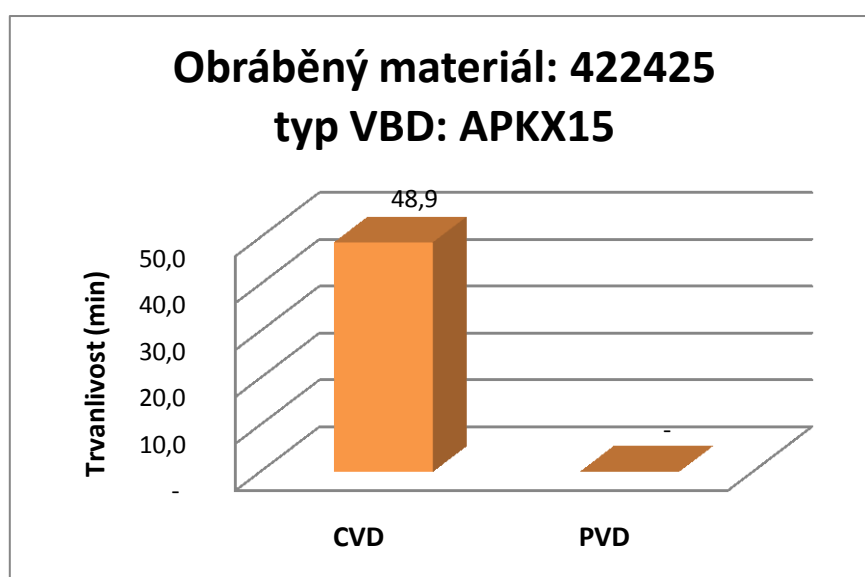
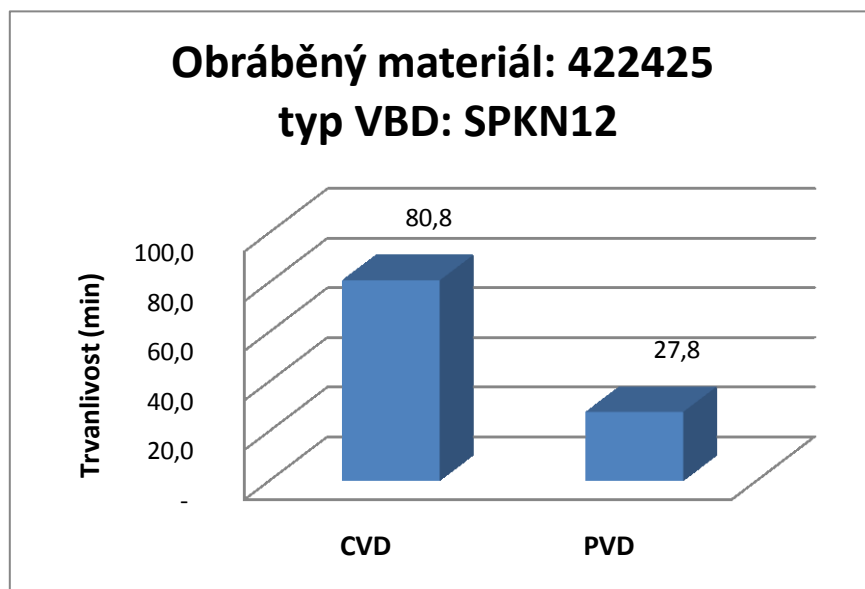
Řezná zkouška č. 2		
Obráběný materiál:	17481.4 – korozivzdorná ocel	
Řezné podmínky:	Řezná rychlost	88 m/min
	Posuv	0,25 mm/ot
	Hloubka třísky	2,0 mm



U druhé řezné zkoušky dosáhla VBD tvaru SPKN12 s povlakem CVD kratší trvanlivosti než s povlakem PVD. Poměr trvanlivosti VBD s povlakem CVD k PVD byl 72,9 %.

VBD tvaru APKX15 s povlakem CVD dosáhla shodné trvanlivosti jako s povlakem PVD. Poměr trvanlivosti VBD s povlakem CVD k povlaku PVD činil 100 %.

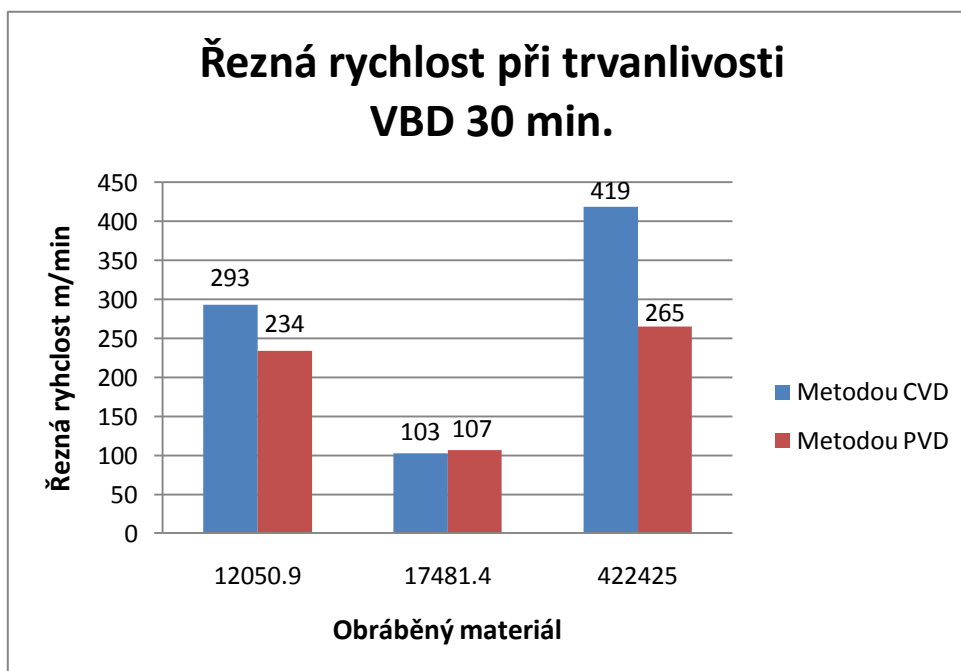
Řezná zkouška č. 3		
Obráběný materiál:	422425 – šedá litina s lupínkovým grafitem	
Řezné podmínky:	Řezná rychlost	279 m/min
	Posuv	0,225 mm/ot
	Hloubka třísky	2,0 mm



Vzhledem ke skutečnosti, že VBD typu APKX15 s povlakem PVD se při frézování obráběného materiálu 422425 nevyužívá, nebyly také prováděny řezné zkoušky ani porovnání jednotlivých druhů povlaků.

U třetí řezné zkoušky dosáhla VBD tvaru SPKN12 s povlakem CVD výrazně delší trvanlivosti než s povlakem PVD. Poměr trvanlivosti VBD s povlakem CVD k PVD byl 290,6 %.

5.2 Stanovení řezné rychlosti při dosažení trvanlivosti 30 minut VBD typu SPKN12



Nejvyšší řezné rychlosti při trvanlivosti vyměnitelné břitové destičky 30 minut jsme dosáhli u obráběného materiálu 422425 (šedá litina s lupínkovým grafitem), naopak nejnižší řezné rychlosti u obráběného materiálu 17481.4 (korozi-vzdorná ocel).

Závěr

Velký podíl na celkovém času obrábění zaujímají vedlejší časy, mezi které lze mimo časů pro technologickou přípravu výroby, seřizování a údržbu obráběcích strojů, manipulaci s obrobkem, kontrolu, atd. zařadit také časy potřebné pro přípravu, seřizování a výměnu nástrojů. Obecně čím vyšší trvanlivost má nástroj, tím méně často je třeba ho vyměňovat a tím více se ušetří na vedlejších časech. Použití vyměnitelných břitových destiček vede ke zkrácení vedlejších časů. Již se nemusí nástroj vytahovat ze stroje, nahrazovat jiným, který je nutné opět přesně ustavit, stačí jen vyměnit, či pootočit břitovou destičku a může se pokračovat v obrábění.

Vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů v současnosti velmi dobře naplňují požadavky kladené na výkonný řezný materiál pro široký okruh běžných i speciálních obráběcích operací. Další potenciál tkví zejména v aplikaci nejrůznějších druhů povlaků v návaznosti na rozvoj metod povlakování a jejich modifikací. Tento vývoj zahrnuje i nejrůznější úpravy před a po povlakování, které mají za cíl snížení vnitřního napětí v povlaku, zvýšení adheze a dosažení hladšího povrchu – princip bývá často dobře střezným výrobním tajemstvím.

Cílem bakalářské práce bylo seznámení s metodami nanášení tenkých vrstev na řezné nástroje, historií povlakování, výhodami a nevýhodami jednotlivých metod, oblastmi jejich použití. Byl popsán způsob technologické přípravy nástroje před povlakováním, povlakovací proces.

Součástí práce byl i vlastní experiment, kde byly srovnány metody povlakování PVD a CVD z hlediska trvanlivosti povlakovaných vyměnitelných břitových destiček.

Životnost vyměnitelné břitové destičky limituje opotřebení řezného břitu. Opotřebení je indikováno jedním nebo několika znaky a dosáhne-li určité mezní hodnoty (což se může projevit např. zhoršením kvality povrchu nebo tolerance rozměru součásti), končí životnost VBD. Volba řezných podmínek může mít na oddálení příznaků opotřebení zásadní vliv a je proto rozhodující pro produktivitu a hospodárnost obrábění. Rovněž každý druh obráběného materiálu má jiné složení a vyžaduje jiné řezné podmínky.

Pokud můžeme shrnout dosažené výsledky experimentu, tak nejdelší trvanlivosti VBD jsme dosáhli metodou CVD u obráběného materiálu 12050.9 – ušlechtilé uhlíkové oceli, VBD typu SPKN12 a naopak nejnižší trvanlivosti jsme dosáhli metodou PVD u obráběného materiálu 422425 – šedé litiny s lupínkovým grafitem, VBD typu SPKN12.

Nejvyšší řezné rychlosti při trvanlivosti VBD 30 minut jsme dosáhli u materiálu 422425 – šedé litiny s lupínkovým grafitem metodou CVD.

Z výsledků experimentu je patrné, že trvanlivost VBD závisí nejen na druhu obráběného materiálu, ale také na řezných podmínkách a typu VBD. Nelze jednoznačně říci, že by některá z metod povlakování byla při tomto hodnocení výrazně lepší.

Povlakované nástroje ze slinutého karbidu získávají díky povlaku tvrdý povrch, který působí jako bariéra pro mechanismy opotřebení a zároveň se díky nízkému koeficientu tření snižuje tepelné zatížení nástroje a to zvyšuje životnost. Používáním nástrojů s povlaky schopnými efektivně obrábět bez použití procesních kapalin, tzv. obrábění za sucha, lze efektivně snížit ekologické zatížení systému, které by v dnešní době nemělo být opomíjeno. V konečném důsledku pak na základě všech těchto aspektů výroby dochází k minimalizaci ekonomického zatížení celého řezného procesu.

Seznam použité literatury

1. SCHEDLER, Wolfgang. *Hartmetall für den Praktiker: Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe*. Düsseldorf: Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 1988. 235 s. ISBN 3-18-400803-7.
2. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vyd. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
3. *Tenké vrstvy*, [online]. [cit. 11. dubna 2011]. Dostupný na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf>
4. HUMÁR, A., *Trendy v povlakování slinutých karbidů*, [online]. [cit. 13. dubna 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutychkarbidu>>.
5. PODJUKLOVÁ, Jitka. *Speciální technologie povrchových úprav I.*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. 76 s. ISBN 80-7078-235-8.
6. *Hodnocení vlastností tenkých vrstev pro aplikace na nástroje*, [online]. [cit. 11. dubna 2011]. Dostupný na World Wide Web: <<http://www.povrchovauprava.cz/uploads/assets/casopisy/pu-2007-03.pdf>>
7. HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*. MM Průmyslové spektrum. 2005, 9, s. 70-72. ISSN 1212-2572.
8. ŠÍMA, M., JANKŮ, R. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. MM Průmyslové spektrum. 2007, 4, s. 72-73. ISSN 1211-2633.
9. KRÍŽ, Antonín a PODANÝ, Pavel. *Vliv strippingu tenkých vrstev na vlastnosti substrátu*. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. r. 2006. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ateam.zcu.cz/prostudenty.html>>.
10. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – I. Část.*, Brno: VUT – FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 s. ISBN 80-214-2189-4.

11. PASTOR, H., BROŤEK, V. Chemické povlakování z plynné fáze. *Pokroky práškové metalurgie VÚPM*. 1979, 4, s. 289-299.
12. HOFMANN, J. Uplatnění metody chemického vylučování z plynné fáze (CVD) při povlakování slinutých karbidů. *Pokroky práškové metalurgie*. 1984, 1, s. 3-45.
13. DRAŠNAR, P. *Otěruvzdorné PVD a CVD povlaky*. Dostupné na World Wide Web: <http://povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf>.
14. ZEMČÍK, O. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.
15. MARŠÍČEK, R. *Postup výroby VBD*. [Elektronická prezentace]. Interní materiál firmy Pramet Tools s.r.o. určený pro školení zaměstnanců a distributorů.